

УДК 532.5.296:534.12

ДИНАМИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЛА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУИ ЖИДКОСТИ

А.А. Аганин, Н.А. Хисматуллина

Аннотация

Рассматриваются упруго-пластические деформации, возникающие в теле в результате двух ударов высокоскоростных кумулятивных струй жидкости, возникающих при коллапсе примыкающих к телу кавитационных пузырьков. Тело моделируется как полупространство из идеального упруго-пластического материала. При построении закона нагружения считается, что кумулятивная струйка жидкости представляет собой цилиндрический столбик с полусферическим концом. Она бьет по телу ортогонально его поверхности. Основное внимание при исследовании уделено изменению положения и конфигурации возникающих в теле зон текучести, деформации его поверхности, влиянию остаточных напряжений. **Ключевые слова:** Кавитационный пузырек, упруго-пластическое тело, пластичность, интенсивность напряжений, остаточные напряжения.

Введение

Одной из основных проблем работающих с жидкостями деталей машин и механизмов (гидротурбин, жидкостных насосов, гребных винтов кораблей, подводных звукоизлучателей и т.д.) является кавитационная эрозия их поверхностей. Вслед за Корнфельдом и Суворовым [1] многие исследователи (например, [2]) считают, что кавитационная эрозия возникает в результате воздействия кумулятивной струи жидкости, образующейся на поверхности пузырька при его коллапсе вблизи тела. При этом однократное воздействие такой струи может и не вызывать видимых изменений поверхности тела. Поэтому для понимания природы кавитационной эрозии важно изучить особенности неоднократного воздействия. Вместе с тем, к настоящему времени большинство работ посвящено однократному воздействию кавитационных пузырьков (например, [3–13]). Многократное воздействие также рассматривалось, но значительно меньше [2, 14].

В настоящей работе изучается динамика приповерхностной части тела при двукратном приложении нагрузки, характерной для ударного воздействия струи жидкости, возникающей на поверхности касающихся тела кавитационных пузырьков при их сжатии [15].

1. Постановка задачи

Рассматривается динамика приповерхностного слоя упруго-пластического тела при двукратном ударном воздействии на его поверхность микроструи жидкости. Струя цилиндрическая, с полусферическим концом. При обоих ударах она движется в сторону неподвижного тела вдоль своей оси с одной и той же скоростью и бьет своим концом в одну и ту же точку поверхности тела. Первоначально поверхность

тела плоская, так что первый удар струи по телу приходится ортогонально его плоской поверхности (рис. 1). В результате первого удара в тонком приповерхностном слое тела в окрестности места воздействия возникают остаточные напряжения, а на поверхности тела – очень мелкая (глубиной порядка десятка нанометров) вмятина с еще меньшим выступом на периферии. Целью настоящей работы является изучение динамики приповерхностного слоя тела, остаточных напряжений в теле и деформаций его поверхности при повторном ударном воздействии в зависимости от остаточных напряжений в теле и вмятины на его поверхности, возникших в результате первого удара.

Давление на поверхности тела вне области воздействия струи $p_0 = 0.1$ МПа. Материал тела – никелевый сплав с плотностью $\rho = 8000$ кг/м³, модулем упругости $E = 196000$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0.3$, пределом текучести при одноосном растяжении $Y_0 = 125$ МПа. Такие сплавы используются для покрытий поверхностей деталей с целью защиты от разрушительного воздействия кавитации. Жидкостью является вода с плотностью $\rho_0 = 1000$ кг/м³, скоростью звука $c_0 = 1500$ м/с. Радиус струи $R_j = 20$ мкм, ее скорость v_j выбрана равной 300 м/с. Подобные струи возникают, в частности, на поверхности касающихся тела кавитационных пузырьков в процессе их схлопывания [16].

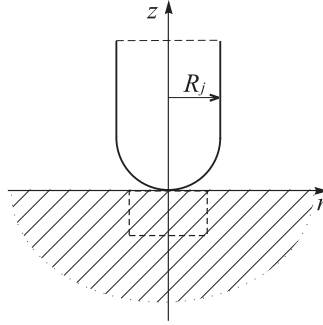


Рис. 1. Цилиндрическая струя жидкости с полусферическим концом в начале (при $t = 0$) ударного воздействия на тело и используемая цилиндрическая система отсчета r, z . Прямоугольником выделена область наиболее существенного влияния струи.

В начале удара струи по телу давление в центре области контакта скачком возрастает от p_0 до $p^* \approx \rho_0 c_0 v_j$.

Рассматривается наиболее часто встречающийся случай, когда диаметр струи намного меньше линейных размеров тела. Поэтому тело моделируется как упруго-пластическое полупространство.

2. Математическая модель и основные положения методики расчета

Аппроксимация закона нагружения поверхности тела принимается в виде

$$p_L(r, t) = p_0, \quad 0 \leq r < \infty \text{ при } t < 0,$$

$$p_L(r, t) = \begin{cases} [p_e(t) - p_c(t)] \left(\frac{r}{R_L} \right)^2 + p_c(t), & 0 \leq r \leq R_L(t) \\ p_0, & r > R_L(t) \end{cases}, \text{ при } t \geq 0, \quad (1)$$

где r – радиальная координата, отсчитываемая от расположенного на оси симметрии струи центра круговой области нагружения радиусом $R_L(t)$. Входящие в (1) функции $p_c(t)$, $p_e(t)$ представляют собой изменение нагрузки в центре $r = 0$ и

на краю $r = R_L(t)$ области нагружения, соответственно. Они определяются выражениями

$$p_c(t) = \begin{cases} p^* (b \bar{t}^2 + 1), & \text{если } p^* (b \bar{t}^2 + 1) < p_e(t) \\ p_e(t), & \text{если } p^* (b \bar{t}^2 + 1) \geq p_e(t) \end{cases},$$

$$p_e(t) = \begin{cases} (a_1 \bar{R}_L^{\alpha_1} + 1) p^*, & \text{при } 0 \leq t \leq \tau \\ a_2 \bar{R}_L^{\alpha_2} p^*, & \text{при } \tau \leq t \leq 3\tau \end{cases}, \quad (2)$$

$$\text{где } p^* = p_0 + \frac{v_j \rho_0 c_0 \rho c_1}{\rho_0 c_0 + \rho c_1}, \quad \bar{t} = \frac{c_1}{R_j} t, \quad \bar{R}_L = \frac{R_L(t)}{R_j}, \quad \tau = \frac{R_j v_j}{2c_0^2},$$

τ — момент времени, когда достигается максимум давления $2p^*$, a_1 , a_2 , α_1 , α_2 , b — безразмерные константы, c_1 — скорость распространения продольных возмущений в теле. При указанных входных данных скорости $v_j = 300$ м/с соответствует давление $p^* = 436$ МПа. На рис. 2 представлены рассчитанные по формуле (1) радиальные профили нагрузки в шесть характерных моментов времени $t_1 = 0.26$ нс, $t_2 = 0.65$ нс, $t_3 = 1.29$ нс, $t_4 = 1.94$ нс, $t_5 = 2.68$ нс, $t_6 = 6.46$ нс ($a_1 = 14.82$, $\alpha_1 = 1.38$, $a_2 = 4.8 \times 10^{-5}$, $\alpha_2 = -5.5$, $b = -2.7 \times 10^{-8}$).

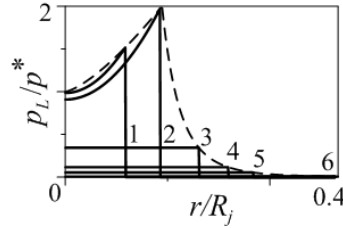


Рис. 2. Радиальные профили нагрузки (1) в шесть моментов времени при $v_j = 300$ м/с

Радиус R_L круговой области нагружения поверхности тела определяется выражением

$$R_L = \sqrt{2Rv_j t - v_j^2 t^2}, \quad (3)$$

Тело считается изотропным, деформации и перемещения — малыми. Для описания динамики тела используются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial(S_{rr} - P)}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \frac{S_{rr} - S_{\varphi\varphi}}{r}, & \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial(S_{zz} - P)}{\partial z} + \frac{S_{rz}}{r}, \\ \frac{\partial S_{rr}}{\partial t} &= \frac{2}{3}\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u}{r} \right), & \frac{\partial S_{zz}}{\partial t} &= -\frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} - 2 \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} \right), \\ \frac{\partial S_{\varphi\varphi}}{\partial t} &= -\frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{2u}{r} \right), & \frac{\partial S_{rz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= -K \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь u , v — компоненты скорости по осям r и z соответственно; S_{rr} , S_{zz} , $S_{\varphi\varphi}$, S_{rz} — компоненты девиатора S тензора напряжений σ , записанные в цилиндрической системе координат, P — всестороннее (гидростатическое) давление; $S = \sigma + Pg$; g — метрический тензор; $\lambda = \rho(c_1^2 - 2c_2^2)$ и $\mu = \rho c_2^2$ — параметры Ламе, $K = \lambda + 2/3\mu$ — коэффициент объемного расширения, c_1 и c_2 — скорости распространения продольных и сдвиговых возмущений.

В пластических зонах выполняется условие текучести Мизеса $\sigma_i = Y_0$, σ_i — интенсивность напряжений,

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + 6\tau_{rz}^2},$$

где $\sigma_z = S_{zz} - P$, $\sigma_r = S_{rr} - P$, $\sigma_\phi = S_{\phi\phi} - P$, $\tau_{rz} = S_{rz}$ — компоненты тензора напряжений σ в цилиндрических координатах.

Если условие текучести нарушается, то есть если σ_i в некоторой точке расчетной области превышает предел текучести, то девиатор тензора напряжений корректируется [17]

$$S_{corr} = \frac{Y_0}{\sigma_i} S. \quad (5)$$

На поверхности тела $z = 0$ полагается

$$\sigma_z = -p_L(r, t), \quad \tau_{rz} = 0, \quad (6)$$

где $p_L(r, t)$ определяется выражением (1).

В начале (при $t = 0$) первого удара струи

$$\sigma_z = -p_0, \quad \sigma_r = \sigma_\phi = -\lambda(\lambda + 2\mu)^{-1} p_0, \quad \tau_{rz} = 0, \quad u = v = 0, \quad (7)$$

В начале второго удара струи напряжения в теле принимаются равными остаточным напряжениям после первого удара, а компоненты скорости $u = v = 0$. При этом с силу малости возникшие после первого удара деформации в теле и на его поверхности не учитываются.

На бесконечном удалении от места приложения нагрузки параметры тела остаются невозмущенными.

В расчетах бесконечная область тела (полупространства) $0 \leq r < \infty$, $-\infty < z \leq 0$ заменяется конечной цилиндрической областью $0 \leq r < r_s$, $h_s < z \leq 0$. Внешние границы $r = r_s$ и $z = h_s$ являются "искусственными". На них ставятся неотражающие условия [18], что позволяет размеры расчетной области принять равными $r_s = -h_s = 2.2R$ [19].

Для численного решения задачи (4), (6), (7) применяется классический метод С.К. Годунова [20]. При этом используется равномерная расчетная сетка с квадратными ячейками с $\Delta r = \Delta z = R/640$. Такая сетка выбрана с учетом сходимости численного решения по мере измельчения ячеек. Шаг по времени определяется из условия устойчивости [20]

$$\tau = \frac{\delta}{c_1} \frac{\Delta r \cdot \Delta z}{\Delta r + \Delta z}$$

при $\delta = 0.95$.

3. Динамика приповерхностного слоя тела при первом и втором ударе струи

Рис. 3 характеризует изменение полей интенсивности напряжений σ_i в приповерхностном слое тела при первом ударе по его поверхности струи со скоростью $v_j = 300$ м/с. Ударное воздействие такой струи задается нагружением (1), а соответствующее первому удару начальное распределение напряжений в теле определяется выражениями (7). В приведенных на рис. 3 полях выделены зоны, в которых интенсивность напряжений находится на пределе текучести. Эти зоны важны, поскольку представляющие интерес области текучести материала могут быть только

внутри этих зон. При рассматриваемой скорости струи предел текучести достигается в самом начале ударного воздействия. В дальнейшем до времени t_6 зона с интенсивностью напряжений на пределе текучести расширяется как вдоль поверхности тела в результате увеличения площади ее нагруженной части, так и вдоль оси симметрии из-за распространения импульса вглубь тела. На отрезке $0 \leq t \leq t_5$ эта зона примыкает к поверхности тела, а затем вследствие уменьшения нагрузки отрывается от нее и постепенно удаляется (рис. 3d). При этом зона с интенсивностью напряжений на пределе текучести не является односвязной. К моменту t_6 (рис. 3f) величина нагрузки в области контакта струи и тела и вне ее становится практически одинаковой, так что различие напряженного состояния тела до начала удара струи и после времени t_6 фактически определяется лишь остаточными напряжениями.

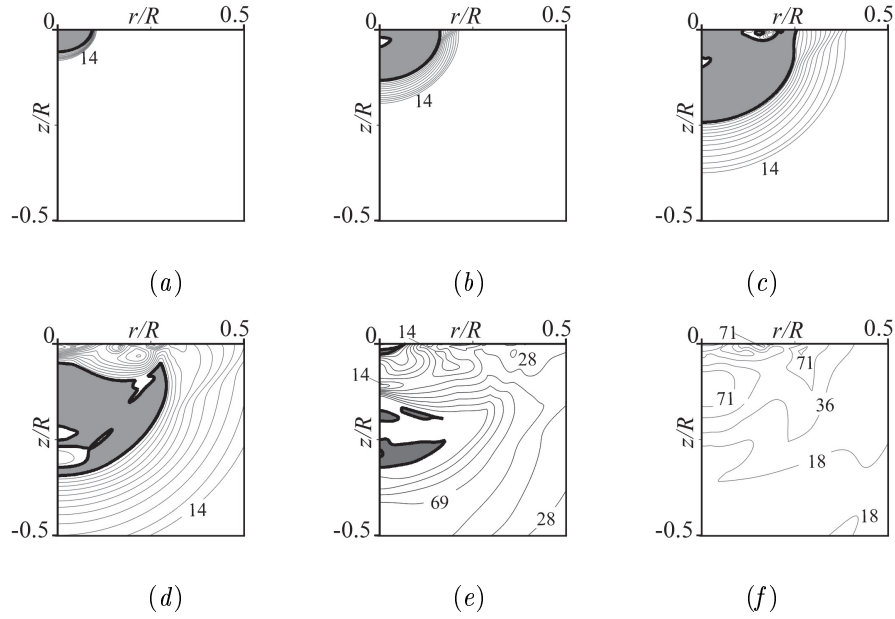


Рис. 3. Поля σ_i в осевом сечении тела при нагрузке (1), соответствующей ударному воздействию струи со скоростью $v_j = 300$ м/с в шесть указанных на рис. 2 момента времени при первом ударе (числовые значения указаны в МПа). В закрашенных областях, границы которых выделены жирной линией, $\sigma_i = Y_0$

На рис. 4 представлены поля интенсивности напряжений σ_i , аналогичные приведенным на рис. 3, но для повторного удара струи. Начальным напряженным состоянием тела при повторном ударе является его состояние в конце первого удара (при $t \geq t_6$). Других отличий начальных данных первого и второго ударов нет, поэтому различие в результатах определяется лишь остаточными напряжениями, реализующимися в теле после первого удара. Видно, что сначала (при $0 \leq t \leq t_2$) при повторном ударе конфигурация зон с интенсивностью напряжений на пределе текучести и поля интенсивности напряжений в небольшой окрестности этих зон мало отличаются от того, что было при первом ударе. Основные отличия наблюдаются вне этих окрестностей, куда влияние возникших в результате удара волн напряжений еще не успело распространиться. При $t = t_3$ конфигурация зоны с предельными значениями интенсивности напряжений при повторном ударе заметно отклоняется от того, что было при первом ударе. При $t = t_4$ эта зона при повторном ударе, в отличие от того, что было при первом ударе, распадается на

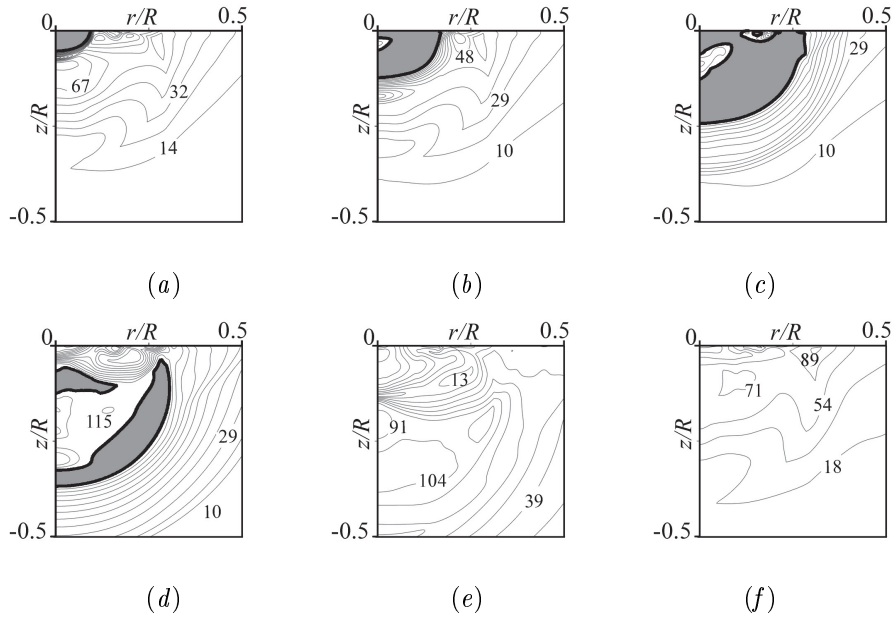


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но при повторном ударе

две довольно большие части. К моменту $t = t_5$ она при повторном ударе полностью исчезает, тогда как при первом ударе это происходит несколько позже. При $t = t_6$ в обоих случаях в теле остаются лишь остаточные напряжения. При этом их уровень после повторного удара несколько выше.

4. Деформация поверхности тела при первом и втором ударах струи

Деформацию поверхности тела в окрестности оси симметрии при первом и повторном ударах характеризуют рис. 5 и 6 соответственно. На рис. 5(a) и 6(a) изображены профили поверхности в три момента времени: в начальный момент, в момент, когда углубление стало максимальным, и в момент, когда углубление перестало изменяться (остаточное углубление). На рис. 5(b) и 6(b) показана зависимость координаты центральной точки поверхности от времени. Видно, что после

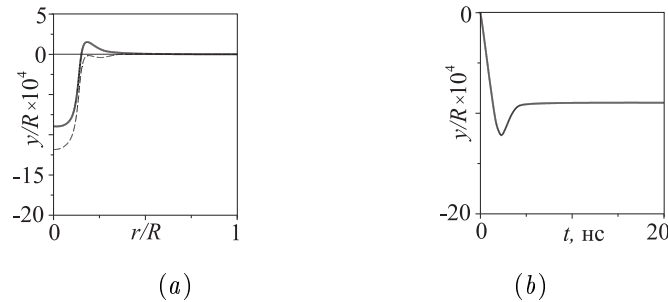


Рис. 5. Динамика поверхности тела при первом ударе струи. (a): Тонкая сплошная линия — положение поверхности до удара, штриховая линия — положение поверхности при максимальной деформации, жирная сплошная — остаточная деформация. (b): временная зависимость координаты центральной точки поверхности

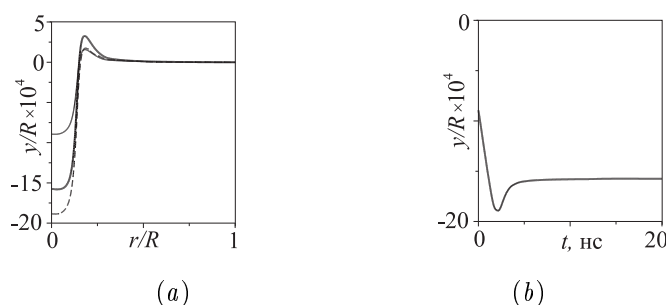


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для повторного удара

первого удара на поверхности тела появляется (а после второго — увеличивается) углубление (ямка), форма которого близка к цилиндрической, ось совпадает с осью симметрии. Глубина этой ямки сначала быстро возрастает до максимального значения, а затем уменьшается до некоторой величины (остаточное углубление), после достижения которой больше не меняется. У края ямки формируется выступ. При первом ударе максимальное углубление равно $0.0012R$ (24 нм), а остаточное углубление — $0.0009R$ (18 нм), при повторном соответственно $0.0019R$ (38 нм) и $0.00158R$ (31.5 нм). Высота выступа при первом ударе составляет $0.00015R$ (3 нм), а при повторном — $0.00033R$ (6.6 нм). Таким образом, при повторном ударе глубина максимальной и остаточной ямки превышает соответствующие значения, достигнутые при первом ударе, более чем в полтора раза, а высота выступа — более чем в два раза. Максимальная глубина достигается в обоих случаях примерно через 2.3 нс после удара. Колебания поверхности в окрестности центральной точки прекращаются после первого удара немного раньше (через ≈ 7.5 нс), чем после второго (через ≈ 10 нс).

Если влияние остаточных напряжений не учитывать, то при повторном ударе остаточное углубление будет иметь глубину, равную $0.0036R$, и высоту выступа $0.0003R$ (значения, в два раза большие, чем при первом ударе).

Заключение

Представлены результаты исследования динамики приповерхностного слоя упруго-пластического тела при двукратном ударном воздействии на его поверхность микроструи жидкости. Струя цилиндрическая с полусферическим концом, дважды бьет по телу в одну и ту же точку ортогонально его поверхности. Второй удар производится тогда, когда в теле остаются лишь остаточные напряжения. Тело моделируется изотропным линейно-упругим полупространством. Его пластическое состояние описывается условием Мизеса. Рассмотрено тело из никелевого сплава ($\rho = 8000$ кг/м³, $c_1 = 5742.9$ м/с, $c_2 = 3069.7$ м/с, предел текучести $Y_0 = 125$ МПа) при ударе по его поверхности водяной струи ($\rho_0 = 1000$ кг/м³, $c_0 = 1450$ м/с, $R_j = 20$ мкм) со скоростью $v_j = 300$ м/с. Показано, что на деформацию поверхности тела в результате повторного удара большее влияние оказывает изменение формы поверхности после первого удара, влияние остаточных напряжений оказывается весьма малым. Остаточные напряжения оказывают влияние на процессы, происходящие внутри тела, в частности на динамику зон, где значение интенсивности напряжений находится на пределе текучести материала.

Работа выполнена в рамках Программы РАН №25П.

Summary

A.A. Aganin, N.A. Khismatullina. Dynamics of elastic-plastic body subsurface layer under impact of a liquid jet. Elastic-plastic deformations in a body resulting from two successive impacts of high-velocity cumulative liquid jets arising during collapse of cavitation bubbles attached to the body are considered. The body is simulated as semi-space of perfect elastic-plastic material. In constructing the law of loading, the cumulative liquid jet is assumed to be a cylindrical column with the semi-spherical end. It strikes the body orthogonally to its surface. Main attention in the study is drawn to variation of position and configuration of yielding zones arising in the body, its surface deformations and influence of residual stresses.
Key words: Cavitation damage, cavitation erosion, jet impact, elastic-plastic body.

Литература

1. Kornfeld M. and Suvorov N. On the destructive action of cavitation // App. Phys. – 1944. – V. 15. – P. 495-506.
2. Preece C.V., Brunton J.H. A comparison of liquid impact erosion and cavitation erosion. // Wear. – 1980. – V. 60. – P. 269-284.
3. Эрозия. Ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
4. Haller K.K., Ventikos Y., Poulikakos D. and Monkewitz P. Computational study of high-speed liquid droplet impact // J. App. Phys. – 2002. – V. 92, No 5. – P. 2821-2828.
5. Чижов А.В., Шмидт А.А. Высокоскоростной удар капли о преграду // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, вып. 12. – С. 18-27.
6. Obreschkow D., Dorsaz N. et al. Confined shocks inside isolated liquid volumes: A new path of erosion? // Ph. Of Fluids. – 2011. – V. 23 (10). – P. 101702-1 – 101702-4.
7. Reboud J.L., and Guelin P. Impact response of an elastoplastic medium // Mech. Res. Commun. – 1988. – V. 15 (4). – P. 253-260.
8. Kennedy C. F., Field J.E. Damage threshold velocities for liquid impact // Journal of Materials Science. – 2000. – V. 35 (21). P. 5331-5339.
9. Field J.E., Camus J.-J., Tinguely M., Obreschkow D., Farhat M. Cavitation in impacted drops and jets and the effect on erosion damage thresholds // Wear. – 2012. – V. 290-291. – P. 154-160.
10. Sanada T., Ando K., and Colonius T. A computational study of high-speed droplet impact // FDMP. – 2011. – V. 7, No. 4. – P. 329-340.
11. Петушков В.А. Численные исследования нелинейных волновых процессов в жидкости и деформируемом теле при высокоскоростном ударном воздействии // ПМТФ. – 1991. – № 2. – С. 134-143.
12. Li N. et al. Liquid drop impact on solid surface with application to water drop erosion on turbine blades, Part I: Nonlinear wave model and solution of one-dimensional impact // Int. J. of Mech. Sciences. – 2008. – V. 50. – P. 1526-1542.
13. Adler W.F. Waterdrop impact modeling // Wear. 1995. – V. 186-187, part 2. – P. 341-351.
14. Thomas G.P. and Brunton J.H. Drop impingement erosion of metals // Proc. Roy. Soc. Lond. – 1970. – Ser. A. I. 314. – P. 549-565.
15. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Халитова Т.Ф. Ударное воздействие струи на жесткую стенку // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Т1. – Казань: Фолиант, 2011. – С. 134-145.
16. Аганин А.А., Ильгамов М.А., Косолапова Л.А., Малахов В.Г. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки // Вестник Башкирского ун-та. – 2013. – Т. 18, No 1. С. 15-21.

-
17. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212-263.
 18. Ильгамов М.А., Гильманов А.Н. Неотражающие условия на границах расчетной области. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 240 с.
 19. Аганин А.А., Малахов В.Г., Халитова Т.Ф., Хисматуллина Н.А. Расчет силового воздействия кавитационного пузырька на упругое тело // Вестник Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета. – 2010. – № 4(22). – С. 6-13.
 20. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

Сведения о каждом из авторов статьи

Аганин Александр Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук

E-mail: *aganin@kfti.knc.ru*

Хисматуллина Наиля Абдулхаевна – к.ф.-м.н., доцент, с.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук

E-mail: *nailya_hism@mail.ru*